



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

TRANSPARENCIAS
TEMA 2: Sensores Resistivos
1a parte

Sensores resistivos. Objetivos

- Conocer el principio de funcionamiento de los principales sensores resistivos.
- Explicar la influencia de la temperatura en todo tipo de medidas con sensores resistivos.
- Distinguir entre los distintos tipos de termistores.
- Linealizar termistores.
- Asociar las aplicaciones a los distintos tipos de sensores.

Sensores resistivos. Introducción

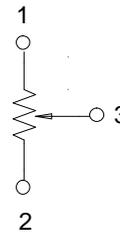
- Basados en la variación de la resistencia eléctrica.
- Prácticamente cualquier magnitud física puede provocar un cambio de resistencia. Son los más numerosos.
- Se trata de sensores moduladores. Es necesaria una fuente de energía externa.
- La temperatura afecta a la resistencia y supone una interferencia.

Sensores resistivos

1. Potenciómetros.
2. Galgas extensométricas.
3. Detectores de temperatura resistivos.
4. Termistores.
5. Magnetorresistencias.
6. Fotorresistencias.
7. Higrómetros resistivos.
8. Detectores de gases.

Potenciómetros. Descripción

- Tres terminales:
 - Dos corresponden a los extremos de una resistencia.
 - El tercero corresponde a un cursor que se mueve sobre la resistencia.



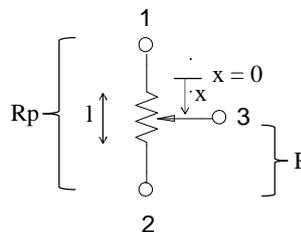
Potenciómetros. Modelo

- Modelo:

$$R = r \frac{l-x}{A} = \frac{r}{A} l(1-a)$$

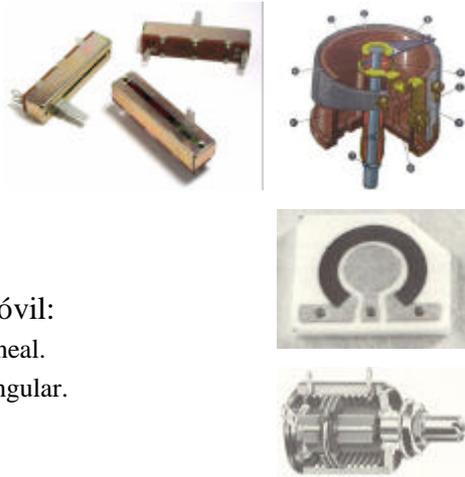
$$R = R_p(1-a)$$

$$a = \frac{x}{l} \Rightarrow 0 \leq a \leq 1$$



Potenciómetros. Construcción

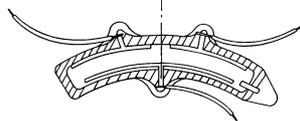
- Base:
 - Plástica.
 - Cerámica.
- Resistencia:
 - Hilo bobinado.
 - Pasta impresa.
- Cursor metálico móvil:
 - Desplazamiento lineal.
 - Desplazamiento angular.
 - Multivuelta.



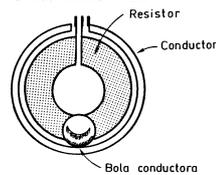
7

Potenciómetros. Inclínómetros

- Inclínómetros resistivos:
 - Basado en electrolito



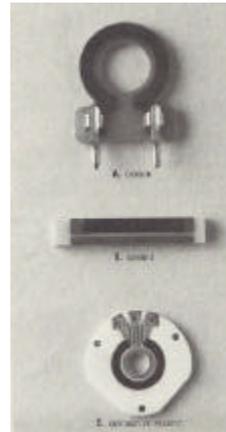
- Basado en bola móvil



8

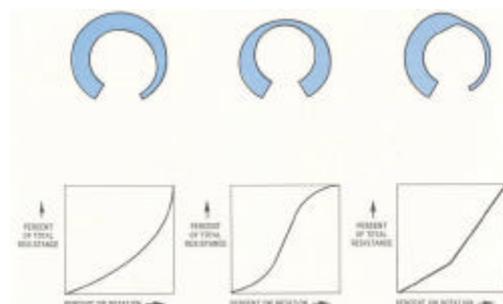
Potenciómetros. Materiales

- Materiales resistencia:
 - Hilo metálico.
 - Grafito.
 - Partículas de carbón aglutinadas en plástico.
 - Partículas de metal aglutinadas en material cerámico (cermet).



Potenciómetros. Ley variación

- Lineales.
- No lineales.

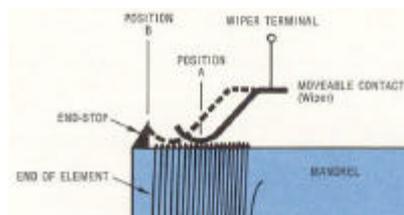


Potenciómetros. Dinámica

- Comportamiento dinámico:
 - Teóricamente, orden 0.
 - En la práctica existen limitaciones de tipo mecánico.
 - Puede ser mayor si está asociado a un sensor de orden superior. Por ejemplo: masa-resorte.

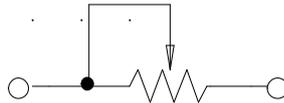
Potenciómetros. Resolución

- Resolución finita:
 - Distribución no uniforme de la resistencia.
 - El contacto del cursor no es puntual.



Potenciómetros. Recorrido

- Existen dos recorridos:
 - Eléctrico.
 - Mecánico.
- El recorrido mecánico suele ser mayor que el eléctrico:
 - Posibilidad de apertura del circuito.
- Para evitarlo:



Potenciómetros. Alimentación CA

- Los potenciómetros tienen capacidades e inductancias parásitas.
- En caso de alimentar en CA, dependiendo de la frecuencia, su efecto puede ser no despreciable.

Potenciómetros. Potencia

- Los potenciómetros son componentes de precisión, no de potencia.
- La potencia que pueden disipar es pequeña, con frecuencia inferior a 1 W.
- También interesa limitar la potencia para evitar el autocalentamiento, ya que la resistencia se modifica con la temperatura.

Potenciómetros. Carga

- Para asegurar el contacto eléctrico es necesario que el cursor ejerza cierta presión.
- Esto supone la aparición de una fuerza de rozamiento.
- Se debe comprobar que no provoque un error de carga excesivo.
- La velocidad del cursor también debe limitarse para evitar «despegues» y un excesivo calentamiento por rozamiento.

Potenciómetros. Especificaciones

Parámetro	Lineal	Angulares
Margen	2 mm a 8 m	10° a 60 vueltas
Linealidad	0,002% a 0,1% fondo escala	
Resolución	50 μm	2° a 0,2°
Potencia	100 mW a 50 W	
Coeficiente de temperatura	20 a 1000 p.p.m./K	
Frecuencia máxima	3 Hz	
Vida útil	Hasta 4×10^8 ciclos	

Sensores resistivos

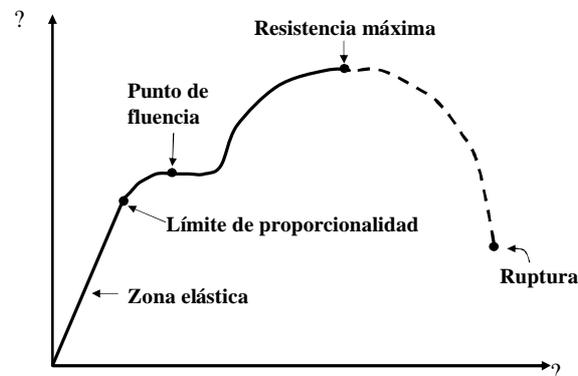
1. Potenciómetros.
2. Galgas extensométricas.
3. Detectores de temperatura resistivos.
4. Termistores.
5. Magnetorresistencias.
6. Fotorresistencias.
7. Higrómetros resistivos.
8. Detectores de gases.

Galgas. Descripción

- Basadas en la variación de la resistencia de un conductor o semiconductor sometido a un esfuerzo mecánico.
- Efecto descubierto por Lord Kelvin en 1856.
- Tienen gran aplicación en la medida de:
 - Deformaciones en estructuras.
 - Pesos (celdas de carga).

Galgas. Zona de funcionamiento

- Se usan en la zona elástica de la galga.



Galgas. Principio

- La resistencia varía a causa del cambio de dimensiones y del valor de la resistividad.
- Al cambio de la resistividad se le denomina «Efecto Piezorresistivo».

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}$$

Galgas. Conductor cilíndrico (I)

- Deformación zona elástica (Ley de Hooke):

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{dl}{l}$$

$$\mu = -\frac{dt/t}{dl/l}$$

- Donde:

- σ : tensión mecánica [Pa].
- E : módulo de Young [Pa].
- μ : coeficiente de Poisson.
- l : longitud [m].
- t : dimensión transversal [m].

Galgas. Conductor cilíndrico (II)

- Efecto piezorresistivo en metales:

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V}$$

- Donde:

- ρ : resistividad [$\Omega \cdot m$].
- C: constante de Bridgman (1,13 a 1,15 en las galgas).
- V: volumen [m^3].

Galgas. Conductor cilíndrico (III)

- $A = \pi \frac{D^2}{4} \rightarrow \frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = -2\mu \frac{dl}{l}$
- $V = \pi \frac{lD^2}{4} \rightarrow \frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + 2 \frac{dD}{D} = (1 - 2\mu) \frac{dl}{l}$
- $\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} [1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)] = k \frac{dl}{l} = k\varepsilon$
- Respuesta lineal.
- k: «Factor de Sensibilidad» de la galga.
- Ocurre lo mismo con otras secciones

Galgas Metálicas

- Factor de sensibilidad:
 - Para materiales típicos: ~ 2 .
 - Platino: 6.
 - Isoelastic: 3,5.
- Rango de medida:
 - $\Delta l < 4\%$.

Galgas Semiconductoras

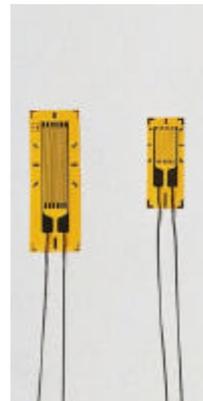
- Menos lineales y más sensibles:
 - Tipo p: $\frac{dR}{R_0} = 119,5\varepsilon + 4\varepsilon^2$
 - Tipo n: $\frac{dR}{R_0} = -110\varepsilon + 10\varepsilon^2$
- Rango de medida:
 - $\Delta l < 0,3\%$.

Galgas. Dinámica

- Comportamiento dinámico:
 - Teóricamente, orden 0.

Galgas. Construcción (I)

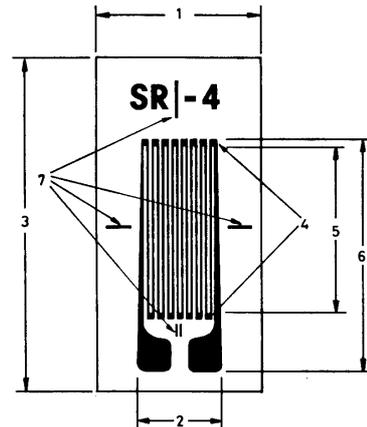
- Resistencia dispuesta de forma que sea sensible a la deformación.
- Las galgas mecánicas pueden fabricarse por:
 - Bobinado.
 - Plegado.
 - Fotograbado.
- Modelos para torsiones.



Galgas. Construcción (II)

- Galga impresa

- 1.- Anchura del soporte
- 2.- Anchura de la galga
- 3.- Longitud del soporte
- 4.- Extremos ensanchados
- 5.- Longitud activa
- 6.- Longitud total de la galga
- 7.- Marcas de alineación

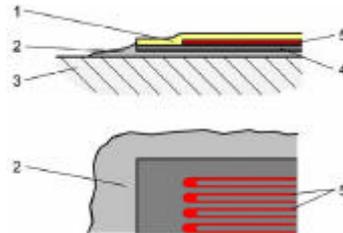


1-

29

Galgas. Fijación

- Fijación fundamental para transmitir esfuerzos.
- Pegamentos especiales:
 - Elásticos.
 - Estables T y t.
- Correcta alineación con ejes y planos de deformación.



1: lámina de cubierta, 2: pegamento,
3: componente, 4: lámina portadora,
5: rejilla de medición

30

Galgas. Potencia

- Las galgas extensométricas son componentes de precisión, no de potencia.
- La potencia que pueden disipar es pequeña, inferior a 1 W.
- Interesa limitar la potencia para evitar el autocalentamiento, ya que la resistencia se modifica con la temperatura. El efecto es más intenso en las semiconductoras.

Galgas. Especificaciones

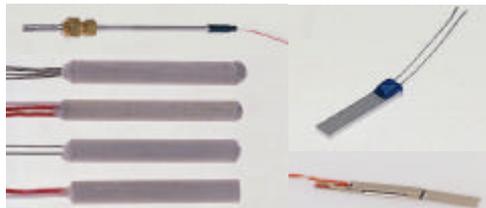
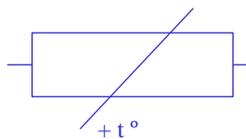
Parámetro	Metálicas	Semiconductoras
Margen de medida	0,1 μe a 40.000 μe	0,001 μe a 3.000 μe
Factor de sensibilidad	1,8 a 2,35	50 a 200
Resistencia	120 Ω , 350 Ω , 600 Ω , ..., 5k Ω	1k Ω a 5k Ω
Tolerancia resistencia	0,1% a 0,2%	1% a 2%
Tamaño	0,4 mm a 150 mm Estándar: 3 mm a 6 mm	1 mm a 5 mm
Potencia	0,15 W/cm ² a 0,77 W/cm ²	< 250 mW

Sensores resistivos

1. Potenciómetros.
2. Galgas extensométricas.
3. Detectores de temperatura resistivos.
4. Termistores.
5. Magnetorresistencias.
6. Fotorresistencias.
7. Higrómetros resistivos.
8. Detectores de gases.

RTD. Descripción

- RTD (Resistive Temperature Detector):
Sensor de temperatura resistivo.
- $\Delta R \propto \Delta T$.



RTD. Principio

- La resistencia depende de:
 - El número de portadores disponibles.
 - Su movilidad.
 - Dimensiones conductor.
- En un metal, un aumento de temperatura:
 - Afecta poco al nº de portadores (e^-).
 - Disminuye la movilidad al aumentar probabilidad de colisión de e^- con red (vibraciones más amplias).
 - Modifica las dimensiones (dilatación).
- Domina efecto sobre movilidad: R aumenta con T.

RTD. Modelo

- Aproximación polinómica:
$$R(T) = R_0(1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2 + \alpha_3 \Delta T^3 + \dots)$$
- Para el platino (Pt):
 - Hilo: $\alpha_1 = 3,90 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_2 = -5,83 \times 10^{-7} \text{ K}^{-2}$
 - Película: $\alpha_1 = 3,912 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_2 = -6,179 \times 10^{-7} \text{ K}^{-2}$
- Hasta 650 °C término no lineal 10 veces menor que término lineal.

RTD. Dinámica

- Comportamiento dinámico:
 - Orden 1.
 - Masa no despreciable. Inercia térmica.

RTD. Construcción

- Materiales metálicos:
 - En hilo bobinado.
 - En película.
- Coeficientes ligeramente distintos para hilo / película.
- Los de película son más baratos por requerir menos material.
- Puede ir protegidas (mayor inercia).



RTD. Materiales

- Convienen valores altos de R_0 para poder despreciar resistencia hilos de conexión.
- Se prefiere resistividad elevada que permite sensores con menos masa (inercia) para igual resistencia.
- Material habitual: platino (Pt100). Se usa como patrón entre $-182,96\text{ °C}$ y $630,74\text{ °C}$. Aguanta bien la corrosión.
- Puede alearse con Au o Rh para disminuir α_2 y aumentar el rango de uso.
- Para altas temperaturas se usa W.
- Para temperaturas criogénicas se usa Rh + Fe, Ge o C.

RTD. Precauciones de Uso

- Temperatura a medir lejos del punto de fusión del material de la RTD.
- Evitar deformaciones:
 - Efecto piezorresistivo.
- Limitar la potencia disipada:
 - Provoca autocalentamiento.
 - Éste implica error en la medida obtenida.

RTD. Autocalentamiento (I)

- La corriente que circula por el sensor eleva su temperatura debido al efecto Joule:

$$p_g = R(T) \cdot i^2$$

- La temperatura final dependerá del equilibrio entre la potencia generada y la potencia disipada al medio:

$$T = cte. \Rightarrow p_g = p_d$$

- Para cuantificar la potencia disipada se emplea el concepto de capacidad de disipación térmica, δ :

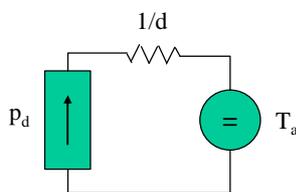
$$n_d = \delta \cdot \Delta T$$

RTD. Autocalentamiento (II)

- El valor de δ no es constante y depende de las condiciones ambientales:
 - Naturaleza del medio.
 - Estado físico: sólido, líquido o gaseoso.
 - En el caso de fluidos, velocidad.
 - Temperatura, etc.
- Se debe utilizar el valor que proporciona el fabricante para las condiciones más próximas a las de uso del sensor.

RTD. Ejemplo Cálculo(I)

- Pt100, $d_{aire} = 6 \text{ mW/K}$, $d_{agua} = 100 \text{ mW/K}$
- ¿Cuál será $I_{m\acute{a}x}$ para medir con un error menor de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$?

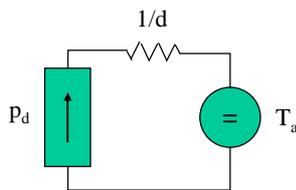


$$\left. \begin{aligned} \Delta T &= \frac{p_d}{d} \\ p_d &= Ri^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta T_{m\acute{a}x} = \frac{RI_{m\acute{a}x}^2}{d}$$

$$\Rightarrow I_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{d \cdot \Delta T}{R}}$$

RTD. Ejemplo Cálculo(II)

- Pt100, $d_{aire} = 6 \text{ mW/K}$, $d_{agua} = 6 \text{ mW/K}$
- ¿Cuál será $I_{m\acute{a}x}$ para medir con un error menor de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$?



Considerando $\Delta R \rightarrow 0$:

$$I_{m\acute{a}x \text{ aire}} = \sqrt{\frac{6 \times 10^{-3} \text{ W/K} \cdot 0,1\text{K}}{1000}} = 2,4 \text{ mA}$$

$$I_{m\acute{a}x \text{ agua}} = \sqrt{\frac{0,1 \text{ W/K} \cdot 0,1\text{K}}{1000}} = 10 \text{ mA}$$

RTD. Ventajas

- Sensibilidad 10 veces mayor que termopares.
- Alta repetibilidad.
- Exactitud y estabilidad a largo plazo.
- Versiones de bajo coste: Cu, Ni.

RTD. Especificaciones

Parámetro	Pt	Cu	Ni	Mo
? @ 20 °C [$\mu\text{O}\cdot\text{cm}$]	10,6	1,673	6,844	5,7
a_1 [K^{-1}]	0,00385	0,0043	0,00681	0,003786
R_0 @ 0 °C [Ω]	25, 50, 100, 200, 500, 1k	10 (20 °C)	50, 100, 120	100, 200, 500, 1k, 2k
Rango [$^{\circ}\text{C}$]	-200 a 850	-200 a 260	-80 a 320	-200 a 200

RTD. Aplicaciones

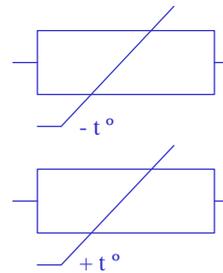
- Directamente, medida de la temperatura.
- Indirectamente, cualquier magnitud que afecte al equilibrio térmico del sensor y altere su temperatura.
- Ej: velocidad de un fluido:
 - $Ri^2 = \delta \cdot \Delta T = kh(v, C_e, K, v)A \cdot \Delta T$
 - Se provoca autocalentamiento y se regula para $T = \text{cte.}$
 - A partir del cambio en la potencia eléctrica se

Sensores resistivos

1. Potenciómetros.
2. Galgas extensométricas.
3. Detectores de temperatura resistivos.
4. Termistores.
5. Magnetorresistencias.
6. Fotorresistencias.
7. Higrómetros resistivos.
8. Detectores de gases.

Termistores

- Termistor (Thermistor): Resistencia térmicamente sensible.
- Tipos:
 - NTC (coeficiente de temperatura negativo)
 - PTC (coeficiente de temperatura positivo)



Termistores. Principio

- Basados semiconductores.
- El efecto dominante es la variación del número de portadores con la temperatura.
- Esta variación se relaciona con el nivel de dopado del material:
 - Bajo, los portadores aumentan con la temperatura y la resistencia disminuye (NTC).
 - Alto, el material se comporta casi como un metal y su resistencia aumenta con la temperatura (PTC).
- Son fuertemente no lineales.

NTC. Modelo 2 parámetros.

- Para un intervalo de temperatura restringido ($\Delta T \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$R(T) = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

- R_0 : resistencia a la temperatura de referencia T_0 (normalmente, $25 \text{ }^\circ\text{C}$).
- B : *Temperatura Característica* del material (2.000 a 5.000 K). No es cte., aumenta con la temperatura.
- Temperaturas en grados Kelvin.

NTC. Modelo 3 parámetros

- Existe otro modelo con tres parámetros ($\Delta T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $|\varepsilon_a| \leq 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$R(T) = e^{A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^3}}$$

- Uso poco frecuente debido a:
 - Cálculos más complejos.
 - Un termistor no suele usarse como sensor de precisión.

NTC. Comparación con RTD

- Para comparar calculamos el coeficiente de sensibilidad α :

$$\alpha = \frac{\frac{dR(T)}{dT}}{R(T)} = -\frac{B}{T^2}$$

- No es constante por no ser un sensor lineal.
- $\alpha_{típico} = 45 \times 10^{-3} K^{-1} \sim 10 \times \alpha_{Pt100}$.
- Más sensibles que RTD.

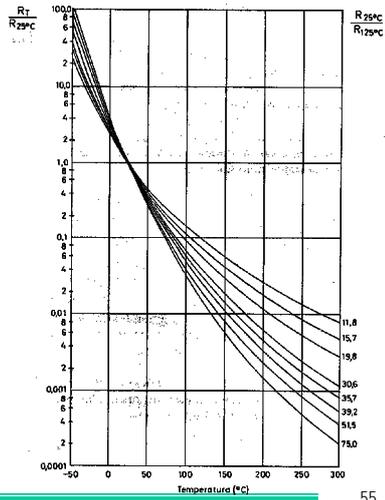
NTC. Caracterización

- Es posible caracterizar una NTC conociendo su valor a dos temperaturas conocidas:

$$B = \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

Termistores

- Variación de R de diversas NTC

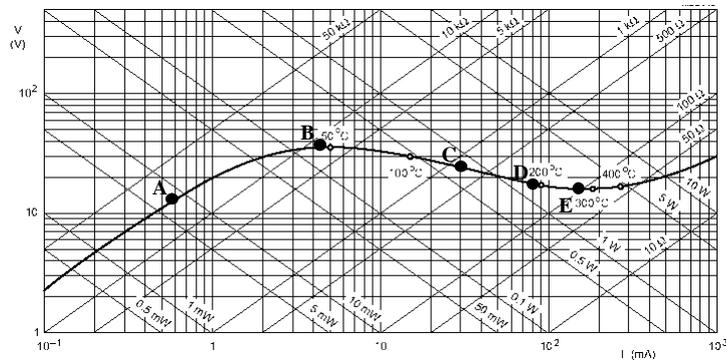


1 -

55

Termistores

- Característica tensión-corriente de una NTC

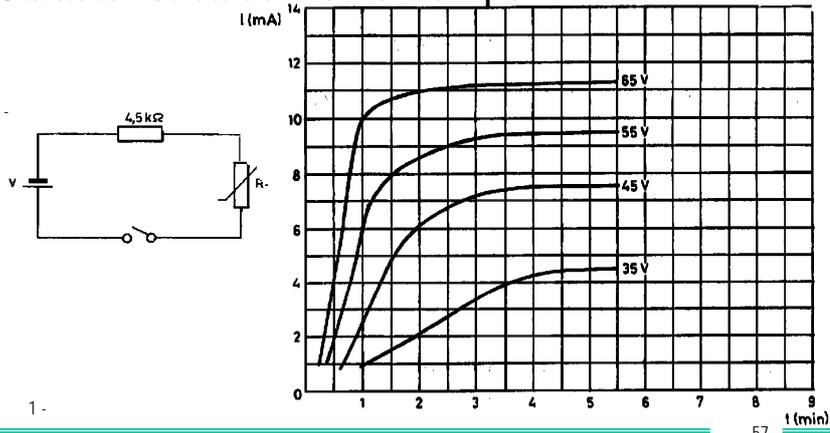


1 -

56

Termistores

- Característica corriente-tiempo



1-

57

NTC. Especificaciones

- Características típicas de una NTC:

Parámetro	Valor
Margen de temperatura	-100°C a 450°C (no en una misma NTC)
Resistencia a 25°C	0,50 a 10MO valores habituales: 1 KO a 10 MO
B	2000 K a 5500 K
Temperatura máxima	>125 °C Régimen permanente: sobre 300°C Régimen intermitente: sobre 600°C
Coeficiente de disipación, δ	1 mW/K en aire en reposo 8 mW/K en aceite
Constante de tiempo térmica	1 ms a 22 s
Potencia disipable	1mW a 1W

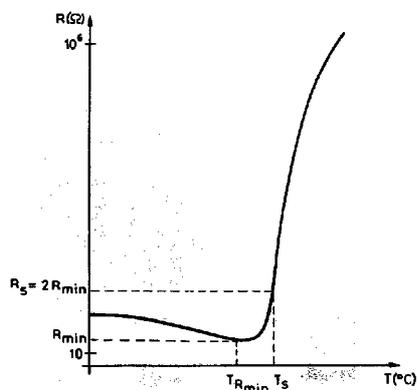
58

PTC. Modelo

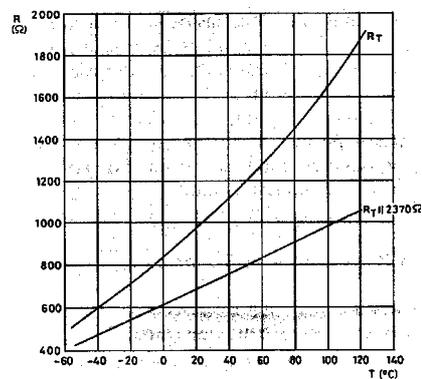
- Se pueden distinguir dos tipos:
 - Tipo cerámico o posistores: incremento brusco de R al superar una la temperatura de Curie.
 - Tipo Si dopado: incremento suave de R con la temperatura. Se comercializan modelos linealizados.

PTC. Curvas

PTC cerámica



PTC Si dopado



Termistores. Estabilidad

- Las características de los termistores (NTC y PTC) cambian de forma notable con el tiempo.
- Se dice que «envejecen».
- Para reducir al mínimo este comportamiento los termistores son sometidos a un envejecimiento artificial en la propia fábrica.
- No puede eliminarse totalmente.

Termistores. Ventajas

- Alta sensibilidad: mayor que RTD.
- Elevada resistencia, lo que implica:
 - Masa pequeña: respuesta rápida.
 - Posibilidad de usar conexiones de longitud elevada.
- Bajo coste.
- Gran variedad de aplicaciones aprovechando el autocalentamiento.

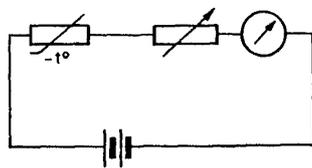
Termistores. Tecnologías

- NTC, sinterización de óxidos metálicos dopados:
 - Rango habitual de temperatura: Ni, Co, Fe, Mn, Cu.
 - Alta temperatura: Y y Zr.
- PTC cerámicos, titanato de bario + titanato de plomo o de circonio.
- PTC Si, Si fuertemente dopando.

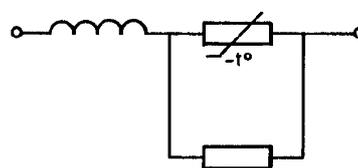
63

Termistores. Usos (I)

- Aplicaciones de medida



– Medida de temperatura



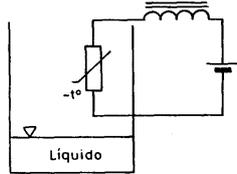
– Compensación térmica de un galvanómetro

1-

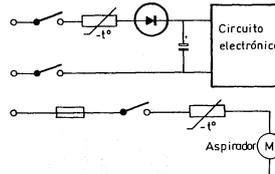
64

Termistores. Usos (II)

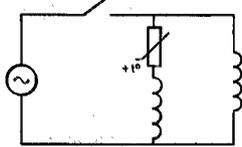
- Aplicaciones basadas en autocalentamiento



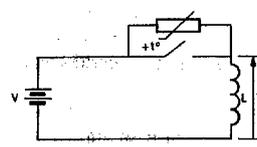
- Medida de nivel de líquidos



- Limitación de la corriente de conexión

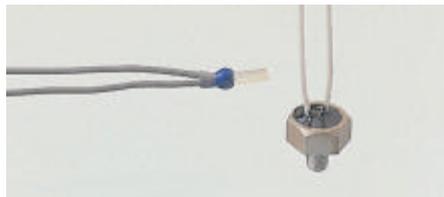
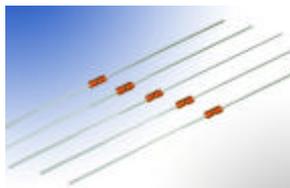


- Arranque de un motor



- Supresión de arcos en un interruptor

Termistores. Encapsulado



NTC. Linealización (I)

- Las NTC son fuertemente no lineales.
- Existen muchas aplicaciones donde esto no es un problema. P. ej. : termostato.
- Pero en otras es más interesante un sensor lineal. P. ej.: medida de la temperatura.
- Es posible linealizarlas colocándolas en paralelo una resistencia fija.

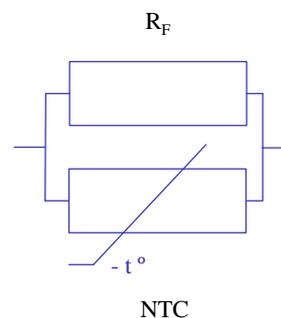
NTC. Linealización (II)

- El precio a pagar es la sensibilidad:

$$R_{\parallel} = R_T \parallel R_F = \frac{R_T \cdot R_F}{R_T + R_F}$$

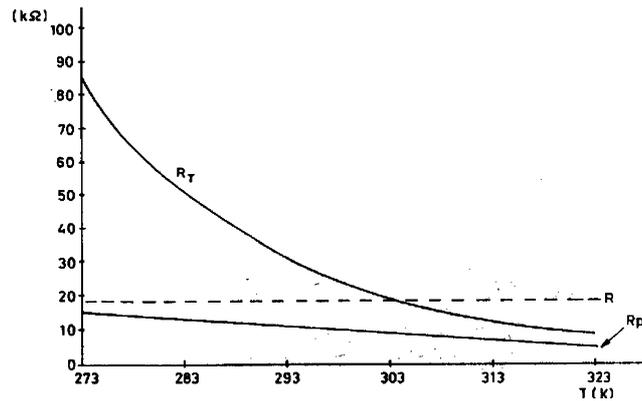
$$\frac{dR_{\parallel}}{dT} = \frac{R_F^2}{(R_T + R_F)^2} \frac{dR_T}{dT}$$

$$\frac{dR_{\parallel}}{dT} \frac{R_{\parallel}}{R_T} = -\frac{B}{T} \frac{1}{1 + \frac{R_T}{R_F}}$$



NTC. Linealización (III)

- Curva linealizada:



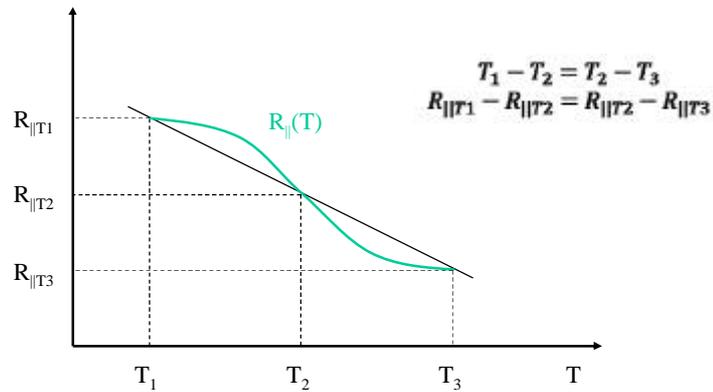
69

NTC. Linealización (IV)

- R_F se elige para obtener la respuesta más lineal posible.
- Dos algoritmos:
 - Método 1: se obliga a pasar a la curva de respuesta por tres puntos de una recta situados a temperaturas equidistantes.
 - Método 2: se fuerza un punto de inflexión en el centro del rango de medida.

70

NTC. Método linealización 1



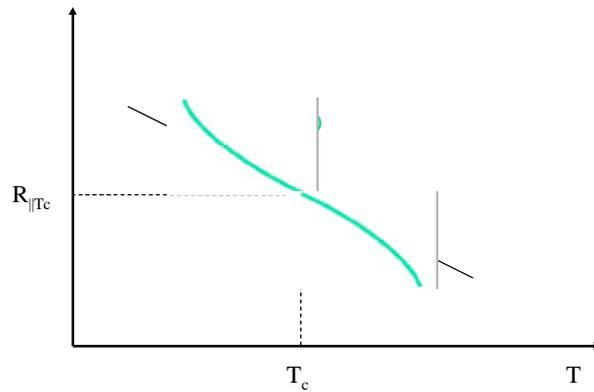
NTC. Método linealización 1

$$\frac{R_F \cdot R_{T1}}{R_F + R_{T1}} - \frac{R_F \cdot R_{T2}}{R_F + R_{T2}} = \frac{R_F \cdot R_{T2}}{R_F + R_{T2}} - \frac{R_F \cdot R_{T3}}{R_F + R_{T3}}$$

$$R_F = \frac{R_{T2}(R_{T1} + R_{T3}) - 2R_{T1}R_{T3}}{R_{T1} + R_{T3} - 2R_{T2}}$$

- Para T_1 y T_3 se escogen los límites del intervalo de medida.
- Para T_2 se toma el valor medio de T_1 y T_3 .

NTC. Método linealización 2



NTC. Método linealización 2

$$\left. \frac{dR_{||}}{dT} \right|_{T=T_c} = 0 \quad \wedge \quad \left. \frac{d^2R_{||}}{dT^2} \right|_{T=T_c} = 0$$

$$R_F = R_{T_c} \frac{B - 2T_c}{B + 2T_c}$$

- Para T_c se toma el centro del intervalo de medida.

NTC. Linealización (V)

- Otras opciones:
 - Modelos comerciales linealizados:
 - Consisten en una asociación de NTC y resistencias fijas.
 - En sistemas basados en μ P también puede linealizarse por SW.

Sensores resistivos

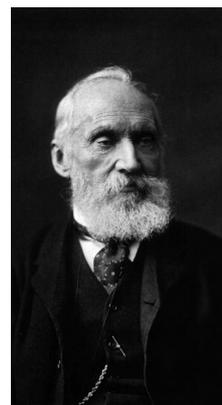
1. Potenciómetros.
2. Galgas extensométricas.
3. Detectores de temperatura resistivos.
4. Termistores.
5. Magnetorresistencias.
6. Fotorresistencias.
7. Higrómetros resistivos.
8. Detectores de gases.

AMR. Fundamentos (I)

- AMR: “*Anisotropic MagnetoResistance*”.
- Conductor:
 - Por el que circula una corriente eléctrica.
 - Sometido a un campo magnético.
- Se producen dos efectos principales:
 - Aparición tensión transversal a la dirección de la corriente: efecto Hall.
 - Aumento de la resistencia: **magnetorresistencia**.

AMR. Fundamentos (II)

- Se manifiesta en elementos en los que la presencia de un campo magnético modifica la resistencia eléctrica que presentan.
- Este efecto fue descubierto por Lord Kelvin en 1856 (1).



(1) W. Thomson, “On the Electro-Dynamic Qualities of Metals: Effects of Magnetization on the Electric Conductivity of Nickel and of Iron”, Proceedings of the Royal Society of London, 8, pp. 546–550 (1856–1857).

Fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=376221>

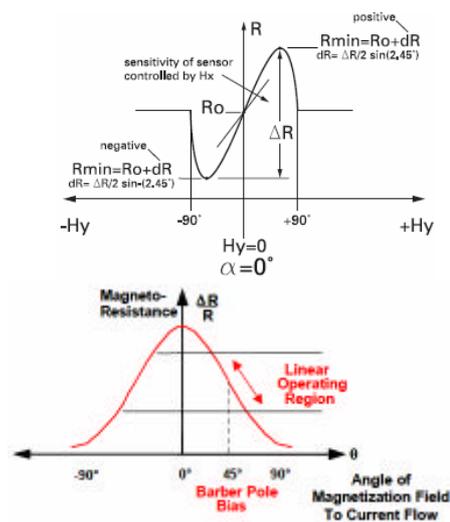
AMR. Fundamentos (III)

- En un material ferromagnético por el que circula una corriente eléctrica, la dispersión de los electrones se ve influenciada por las líneas de campo magnético.
- La resistencia eléctrica disminuye a lo largo de las líneas de magnetización, y aumenta si se sitúa cruzado respecto a las líneas de campo.
- Este fenómeno se denomina magnetorresistencia anisótropa (AMR).



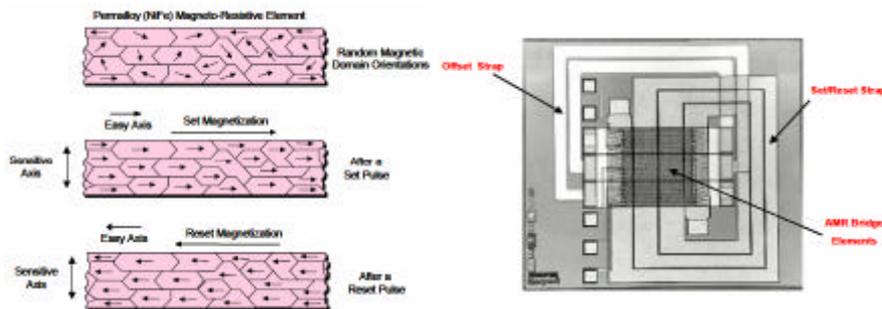
AMR. Fundamentos (IV)

- Efecto fuertemente:
 - No lineal.
 - Direccional.
- Linealización respuesta:
 - Polarización adecuada del material.
 - Ajuste ángulo corriente/campo



AMR. Polarización

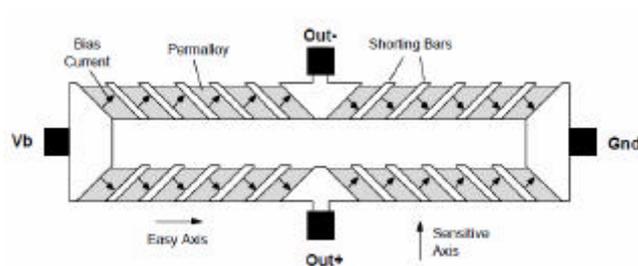
- El sensor es sometido a pulsos de “set” y/o “reset” durante su inicialización:



81

AMR. Configuración típica

- La configuración más habitual es formando un puente de Wheatstone:



82

AMR. Ventajas

- Ventajas:
 - Su modelo es de orden cero, frente a otros sensores de mayor orden (ej, inductivos).
 - Es más sensible y presenta mayor margen de temperatura y frecuencia que el de efecto Hall.
- Inconvenientes:
 - El cambio de resistencia es pequeño (>5%).
 - No es lineal.
 - R depende de la temperatura.

AMR. Tecnologías

- Aleaciones ferromagnéticas (película fina) sobre soporte de vidrio o cerámico:
 - Permalloy (Aleación formada aproximadamente por un 20% de hierro y un 80% de níquel.).
 - Aleaciones de NiFeCo.
 - Aleaciones de NiFeMo.

AMR. Aplicaciones

- Medida directa del campo magnético:
 - Magnetómetros.
 - Brújulas electrónicas.
 - Registro de audio.
 - Registro datos: HDD, hoy día mediante magnetorresistencia gigante GMR).
- Medida indirecta (por cambios inducidos en campo):
 - Sensores de desplazamiento.
 - Sensores de posición
 - Detectores de proximidad.

AMR. Valores típicos

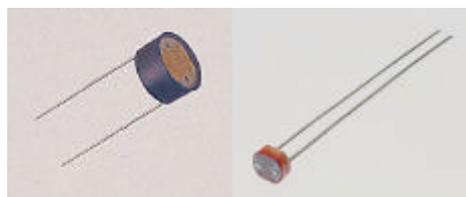
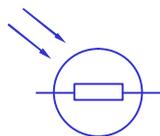
Configuración en Puento de Wheatstone	
Campo H máximo [A/m]	$\pm 10^4$ a $\pm 2 \times 10^4$
Sensibilidad [$\mu\text{V}/(\text{A}/\text{m})$]	0,06 a 2,5
Coeficiente de temperatura [%/K]	-0,4 (V cte.) -0,12 (I cte.)
Linealidad	3% F.S. 1% a $\frac{1}{2}$ F.S.
Deriva sensibilidad (-40°C/120°C) [%/K]	0,1

Sensores resistivos

1. Potenciómetros.
2. Galgas extensométricas.
3. Detectores de temperatura resistivos.
4. Termistores.
5. Magnetorresistencias.
6. Fotorresistencias.
7. Higrómetros resistivos.
8. Detectores de gases.

Fotorresistencias

- Simbolo y ejemplo



LDR. Fundamentos (I)

- Basadas en la variación de la resistencia eléctrica de un semiconductor al incidir sobre él radiación luminosa.
- Radiación luminosa:
 - Radiación electromagnética con longitud de onda entre 1mm y 10nm.

LDR. Fundamentos (II)

- Efecto debido al incremento de portadores de carga al pasar e^- de la banda de valencia a la de conducción gracias a la energía de los fotones:

$$E_{\text{fotón}} = h\nu$$

Cte. de Planck = $6,62 \times 10^{-34}$
Ws²

Frecuencia del
fotón

LDR. Fundamentos (III)

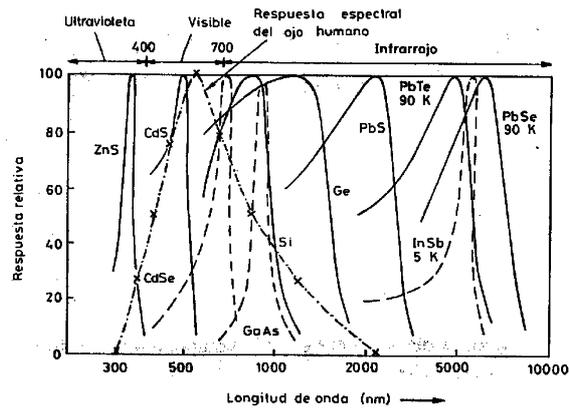
- Efecto **fotoeléctrico interno** o fotoconductor:
 - La energía del fotón **NO ES** suficiente para expulsar el e^- del material.
- Efecto **fotoeléctrico externo**:
 - La energía del fotón **ES** suficiente para expulsar el e^- del material.
- Las LDR se basan en el efecto fotoconductor.

LDR. Fundamentos (IV)

- Las LDR presentan una ventana de sensibilidad:
 - Límite superior: fotones con energía suficiente para promover e^- .
$$\lambda < \frac{ch}{E_0}$$
 - Límite inferior: transparencia del material a las longitudes de onda cortas.
- La ventana depende del material empleado.

LDR. Respuesta espectral

- Es necesario elegir el material en función de la aplicación:



93

LDR. Modelo (I)

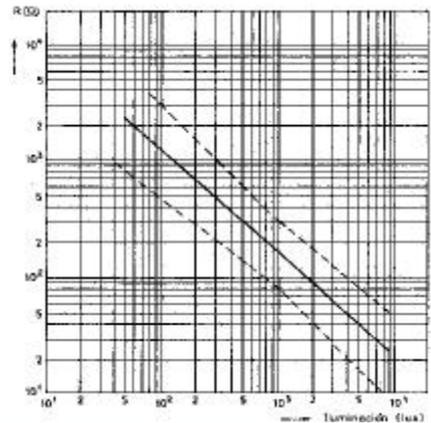
- Las LDR tienen una respuesta fuertemente no lineal.
- Modelo aproximado:

$$R = AE^{-\alpha}$$
- E : iluminación [lux].
- A y α dependen del material y del proceso de fabricación (típicamente: $\alpha \in [0,7, 0,9]$).

94

LDR. Modelo (II)

- Característica resistencia-iluminación:



Sensores resistivos

1. Potenciómetros.
2. Galgas extensométricas.
3. Detectores de temperatura resistivos.
4. Termistores.
5. Magnetorresistencias.
6. Fotorresistencias.
7. Higrómetros resistivos.
8. Detectores de gases.

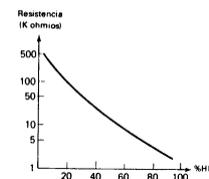
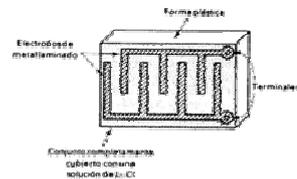
Higrómetros. Descripción

- Un higrómetro es un elemento capaz de medir la humedad en contacto con él.
- Humedad es la cantidad de vapor de agua presente en un gas, o de agua adsorbida o absorbida en un líquido o sólido.
- Según el diccionario de la RAE:
 - Adsorber: atraer y retener en la superficie de un cuerpo moléculas o iones de otro.
 - Absorber: ejercer atracción sobre un fluido sobre el que está en contacto, de modo que las moléculas de éste penetren.



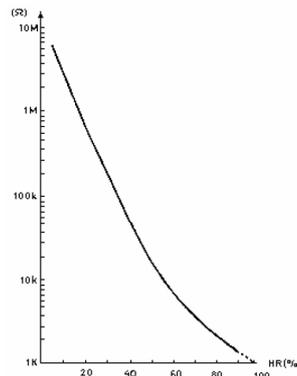
Higrómetros. Principio

- Muchos aislantes eléctricos presentan una disminución de la resistividad y un aumento de constante dieléctrica al aumentar su humedad relativa (1)(2).
 - Si medimos su resistencia: higrómetro resistivo.
 - Si medimos su capacidad: higrómetro capacitivo.
- (1) Humedad absoluta: masa de vapor de agua contenida en un volumen de gas. Se mide en g/m^3
- (2) Humedad relativa: relación entre la presión parcial de vapor de agua existente y la necesaria para que haya saturación a una temperatura dada. Se mide en %



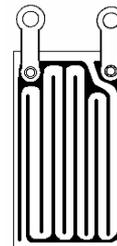
Higrómetros. Respuesta

- Tienen una respuesta fuertemente no lineal:



Higrómetros. Tecnologías

- Películas de sales higroscópicas:
 - LiCl, BaF₂, P₂O₅.
- Alúmina (Al₂O₃): más para capacitivos.
- Sustratos poliméricos: los más usados actualmente.



Higrómetros. Limitaciones

- Es recomendable medir con CA para evitar fenómenos de electrólisis.
- Para HR elevadas: mejor resistivos.
- Para HR reducidas: mejor capacitivos.

Sensores resistivos

1. Potenciómetros.
2. Galgas extensométricas.
3. Detectores de temperatura resistivos.
4. Termistores.
5. Magnetorresistencias.
6. Fotorresistencias.
7. Higrómetros resistivos.
8. Detectores de gases.

Detectores de gases.

- Dejaremos su estudio para otra ocasión.
- Alguna información sobre este sensor está disponible en:
 - Libros:
“Sensores y acondicionadores de señal”. Pallás.
 - Web:
<http://www.figaroco.jp/en/>